

УДК 535.42+537.86.22

**ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ  
ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ****С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк***Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель***LASER THERMOSPLITTING OF THE GLASS TUBES****S.V. Shalupaev, Y.V. Nikitjuk***F. Scorina Gomel State University, Gomel*

Выполнено моделирование процесса лазерного термораскалывания стеклянных изделий трубчатой формы. Расчеты термоупругих полей были выполнены для однолучевых и двухлучевых вариантов реализации технологии лазерного термораскалывания. Показано, что для практического использования целесообразно применение двухлучевого способа лазерной резки стеклянных трубок.

**Ключевые слова:** лазерная резка, двухлучевой метод, стекло.

Modelling of the process of laser thermosplitting of glass products of the tubular form is executed. Calculations of thermoelastic fields for one-beam and two-beam variants of realisation of technology of laser thermosplitting have been performed. It is shown, that for practical use the application of a two-beam way laser cutting of fragile glass tubes is expedient.

**Keywords:** laser cutting, dual-laser-beam method, glass.

**Введение**

Важной разновидностью лазерного термораскалывания является разделение хрупких неметаллических материалов трубчатой формы. Резка стеклянных труб методом лазерного термораскалывания имеет перед традиционными способами ряд неоспоримых преимуществ, к которым в первую очередь следует отнести высокое качество получаемых торцевых поверхностей. Одни из первых результатов по лазерной резке стеклянных труб методом термораскалывания приведены в [1]. Развитие данной технологии привело к созданию целого ряда ее модификаций [2]–[3]. Нужно отметить, что во всех вышеперечисленных случаях разделение хрупких неметаллических материалов трубчатой формы было выполнено с использованием излучения с длиной волны 10,6 мкм. Полученные авторами положительные результаты использования двухлучевой технологии при разделении методом термораскалывания плоскопараллельных образцов создали предпосылки для проведения исследования влияния воздействия дополнительного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм на процесс лазерного термораскалывания изделий трубчатой формы [4]–[5].

**1 Постановка задачи**

Анализ известных работ и собственные исследования позволили выделить несколько основных схем обработки, обеспечивающих приемлемые результаты при практическом использовании.

В соответствии с первой схемой стеклянная трубка подвергается лазерному нагреву в течение нескольких оборотов до образования разделяющей трещины.

При обработке по второй схеме в течение нескольких оборотов часть материала трубки нагревается лазерным излучением и одновременно на некотором удалении от зоны лазерного нагрева поверхность трубки охлаждается. При этом в материале формируется не сквозная лазерно-индуцированная трещина.

Использование третьей схемы предполагает, что трубка попадает в зону воздействия лазерного излучения, далее, совершив несколько оборотов вокруг своей оси, поверхность трубки подвергается воздействию хладагента, причем трубка продолжает вращение при одновременном воздействии лазерного излучения и хладагента (таким образом, третья схема является последовательным сочетанием первых двух).

Для расчета термоупругих полей был использован метод конечных элементов [6]. Моделирование проводилось для трубок из стекла С52. Так как величины теплофизических свойств стекла в значительной степени зависят от температуры, а при лазерном термораскалывании стеклоизделий трубчатой формы температура меняется в широких пределах, то в расчетах были учтены соответствующие зависимости [1]. Модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент температурного расширения и плотность приняты равными соответственно:  $E = 380$  ГПа,  $\nu = 0,222$ ,  $\alpha_T = 80 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\rho_0 = 3960 \text{ кг/м}^3$ .

При выполнении расчетов были использованы следующие параметры лазерных пучков: большая ось  $A=6 \cdot 10^{-3}$  м, малая ось  $B=1 \cdot 10^{-3}$  м для пучка с длиной волны излучения  $\lambda=10,6$  мкм и мощностью излучения  $P=15$  Вт; радиус пятна излучения  $YAG$  – лазера с мощностью излучения  $P_0=40$  Вт составлял  $R=1 \cdot 10^{-3}$  м.

Расчеты проведены для трубки с внешним радиусом, равным 7 мм, внутренним радиусом, равным 6 мм, и длиной в осевом направлении 20 мм. Скорость вращения трубки относительно лазерных пучков принималась равной 45 оборотов в минуту. Считалось, что под действием хладагента обеспечивается охлаждение поверхности трубки с коэффициентом теплоотдачи, равным  $8000 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$  [7].

Моделирование резки трубок осуществлялось как для однолучевых вариантов обработки с использованием  $\text{CO}_2$  – лазера и  $YAG$  – лазера, так и для двухлучевого варианта, сочетающего одновременное воздействие  $\text{CO}_2$  и  $YAG$  – лазеров. Для всех вариантов обработки были выполнены расчеты зависимости температуры и напряжений, действующих в осевом направлении трубки, от номера оборота для трех различных схем временной последовательности воздействия лазерного излучения и хладагента на обрабатываемое изделие (рисунки 1–6).

## 2 Анализ результатов

Сравнивая представленные на рисунках 1, 3, 5 расчетные зависимости температуры в фиксированных точках (1 – на внешней поверхности трубки; 2 – в середине стенки трубки; 3 – на внутренней поверхности трубки), можно сделать вывод о том, что дополнительное воздействие лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм не приводит к существенным изменениям характера этих зависимостей по сравнению с вариантом однолучевой обработки  $\text{CO}_2$ -лазером. Можно отметить небольшое увеличение значений максимальных температур при использовании каждой из схем двухлучевой обработки по сравнению с соответствующими схемами однолучевой обработки  $\text{CO}_2$ -лазером, которое, как и следовало ожидать, в наибольшей степени проявляется в удаленных от поверхности слоях материала.

Анализируя рисунки 1 а, 1 б, 1 в, видим, что при многократном лазерном нагреве материала трубки, вращающейся вокруг своей оси относительно неподвижного лазерного луча (или лучей – при двухлучевой обработке), температура в каждой точке ее внешней поверхности периодически резко повышается под воздействием лазерного излучения и плавно уменьшается вследствие относительно небольшой теплопроводности стекла. При этом наблюдается повышение максимальной температуры стекла. Нужно отметить, что в случае однолучевой обработки

$YAG$ -лазером, таким образом изменяется температура по всему объему трубки (рисунок 1 б).

При использовании второй схемы (рисунок 3), являющейся по своей сути схемой управляемого лазерного термораскалывания, примененной для обработки тел трубчатой формы, происходит многократный быстрый локальный нагрев обрабатываемой поверхности. Он чередуется с быстрым охлаждением, обусловленным воздействием хладагента. При этом практически отсутствует повышение максимальной температуры стекла. Таким образом, каждый оборот характеризуется практически одинаковыми изменениями температуры трубки.

Зависимости температуры от номера оборота, характерные для третьей схемы обработки (рисунок 5), на первом этапе характеризуются особенностями, аналогичными указанным ранее особенностям первой схемы: температура точек поверхности периодически резко увеличивается, а затем плавно уменьшается. При этом повышается максимальная температура образца. На втором этапе обработки зависимости температуры в точках поверхности трубки от номера оборота аналогичны наблюдаемым при использовании второй схемы: температура в точках поверхности периодически резко увеличивается, а затем резко уменьшается без изменения максимальной температуры. Описанное выше изменение температуры при использовании третьей схемы является следствием того, что эта схема обработки является последовательным сочетанием первых двух.

Сравнивая расчетные зависимости напряжений, действующих в осевом направлении трубки, от номера оборота при однолучевой обработке  $\text{CO}_2$ -лазером и при двухлучевой обработке (рисунки 2 а, 4 а, 6 а и рисунки 2 в, 4 в, 6 в), можно сделать вывод о том, что при реализации однолучевого (с использованием  $\text{CO}_2$ -лазера) и двухлучевого разделения основные особенности изменения осевых напряжений в фиксированных точках обрабатываемого материала с течением времени сохраняются. При этом дополнительным воздействием излучения  $YAG$ -лазера обусловлено значительное увеличение как растягивающих напряжений, так и напряжений сжатия, что в свою очередь обуславливает значительное увеличение вероятности инициирования и стабильного развития разделяющей микротрещины. Нужно отметить, что анализ рисунков 2 б, 4 б, 6 б позволяет сделать вывод о неэффективности самостоятельного использования излучения с длиной волны в 1,06 мкм для разделения методом термораскалывания стеклоизделий трубчатой формы. Данное обстоятельство обусловлено недостаточно высоким значением коэффициента поглощения силикатных стекол на этой длине волны.

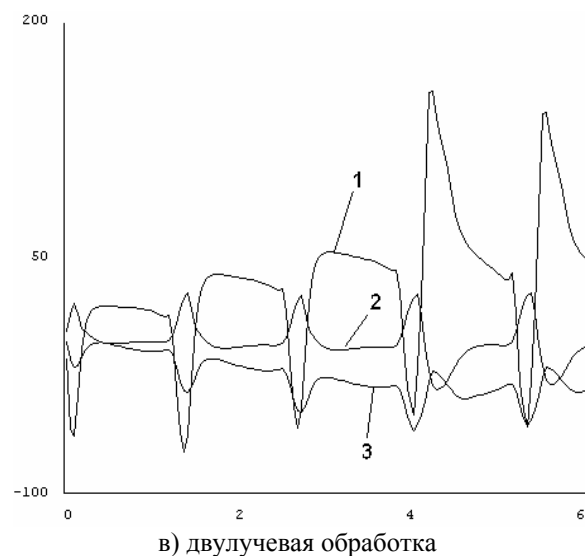
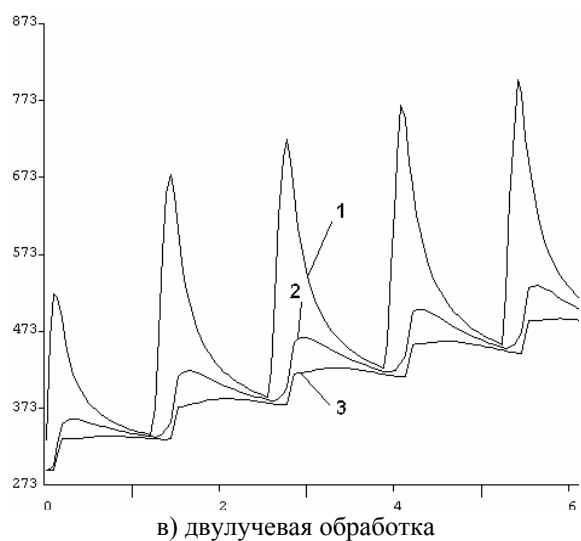
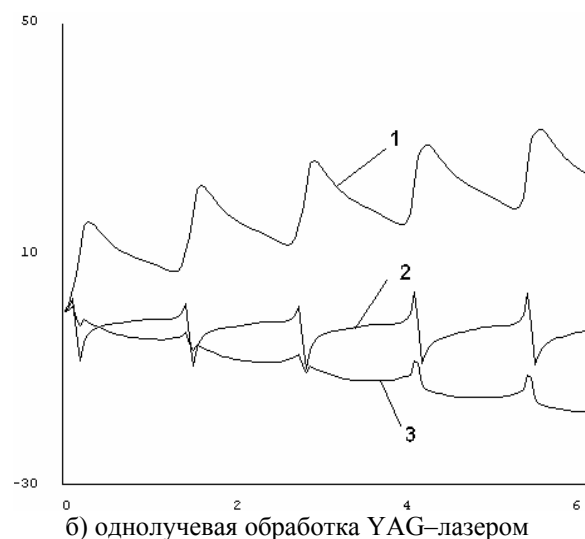
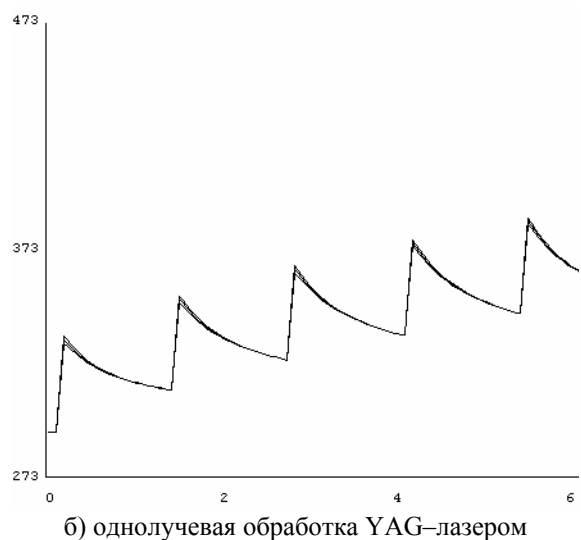
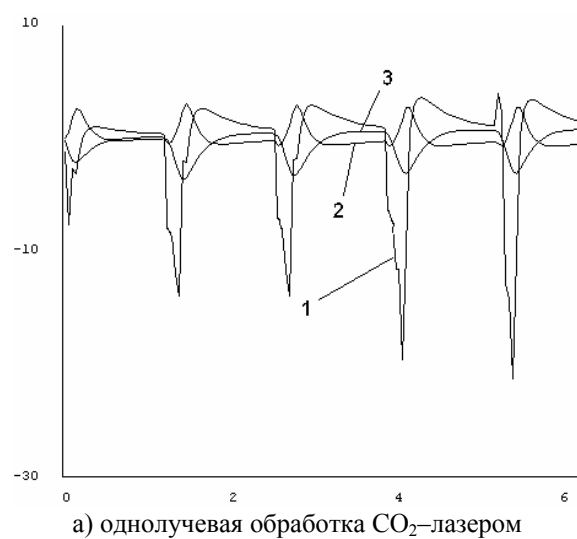
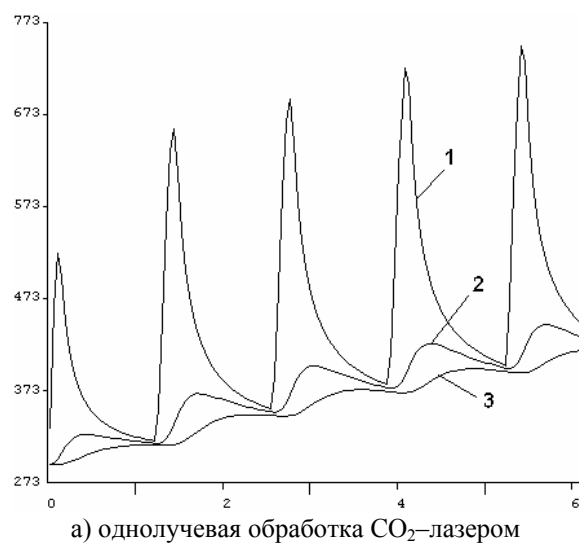
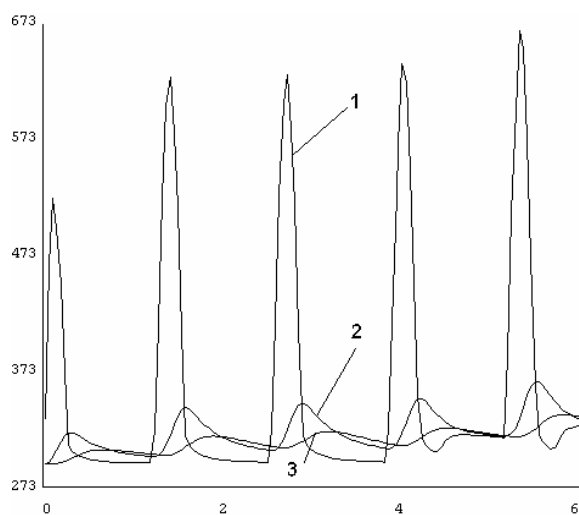
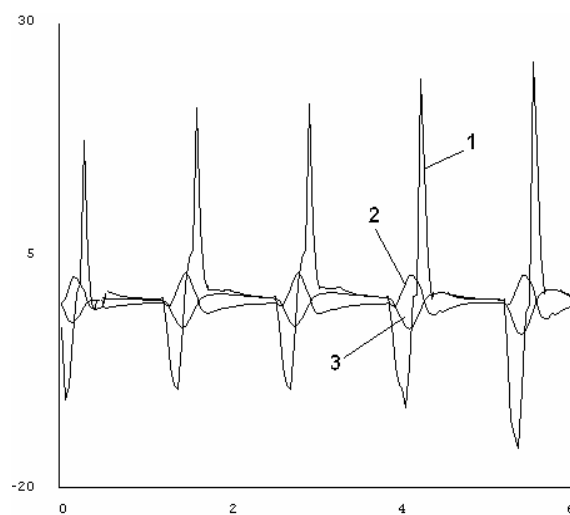


Рисунок 1 – Расчетные зависимости температуры в фиксированных точках от номера оборота при обработке по первой схеме, К

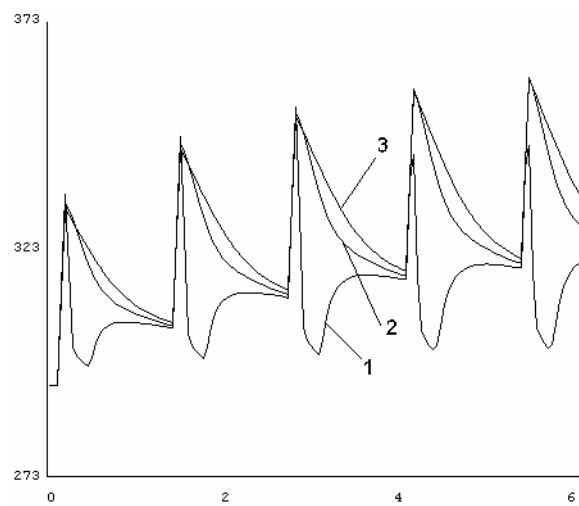
Рисунок 2 – Расчетные зависимости напряжений в фиксированных точках от номера оборота при обработке по первой схеме, МПа



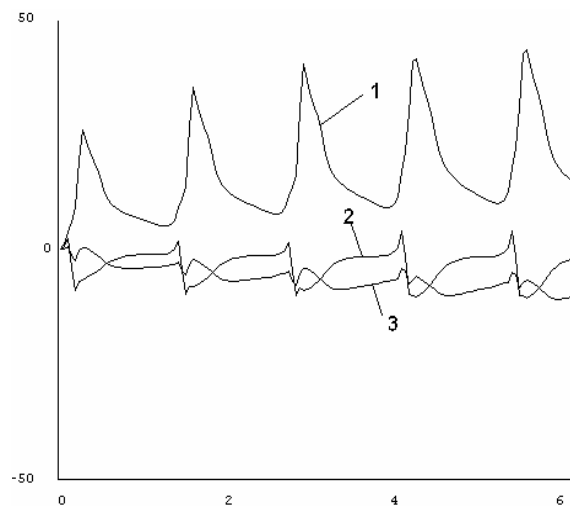
а) однолучевая обработка  $\text{CO}_2$ -лазером



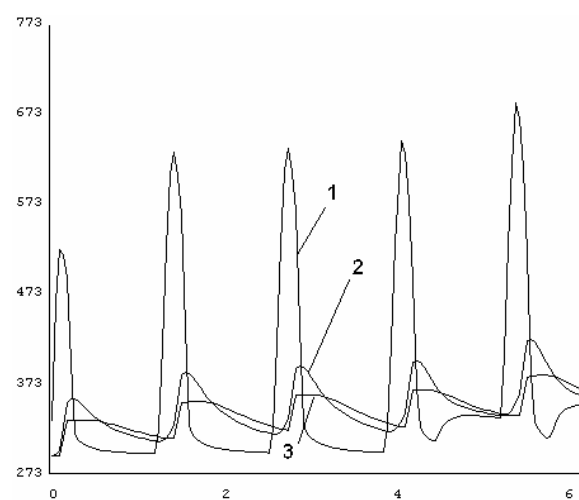
а) однолучевая обработка  $\text{CO}_2$ -лазером



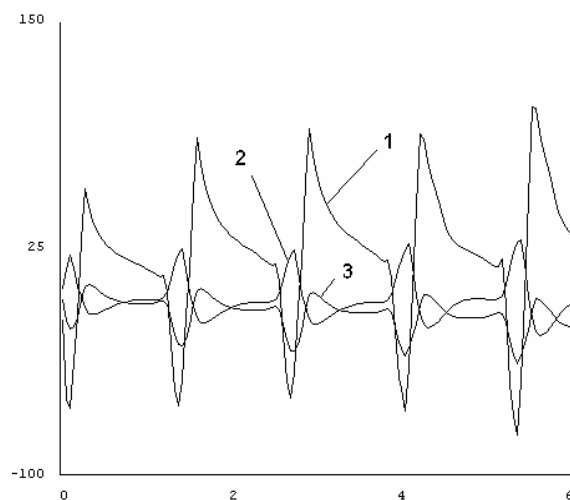
б) однолучевая обработка YAG-лазером



б) однолучевая обработка YAG-лазером



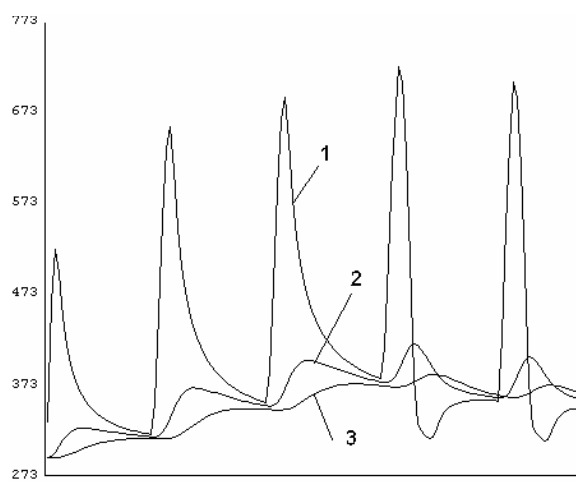
в) двухлучевая обработка



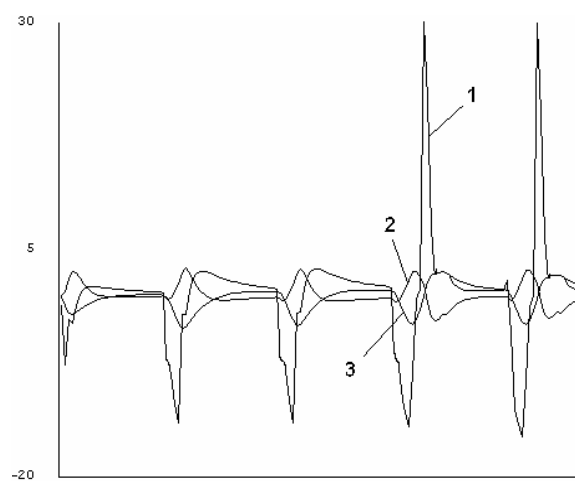
в) двухлучевая обработка

Рисунок 3 – Расчетные зависимости температуры в фиксированных точках от номера оборота при обработке по второй схеме, К

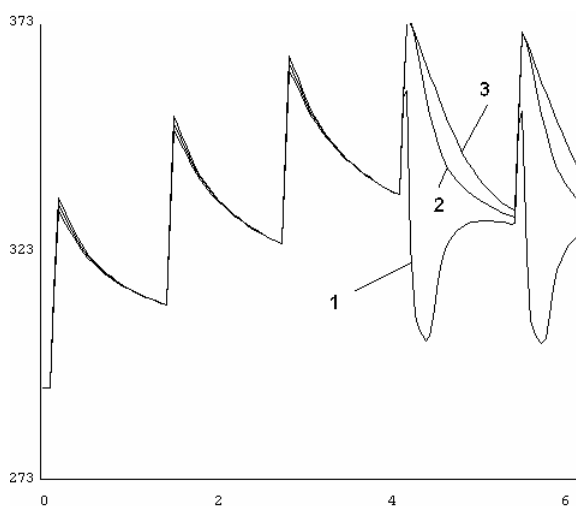
Рисунок 4 – Расчетные зависимости напряжений в фиксированных точках от номера оборота при обработке по второй схеме, МПа



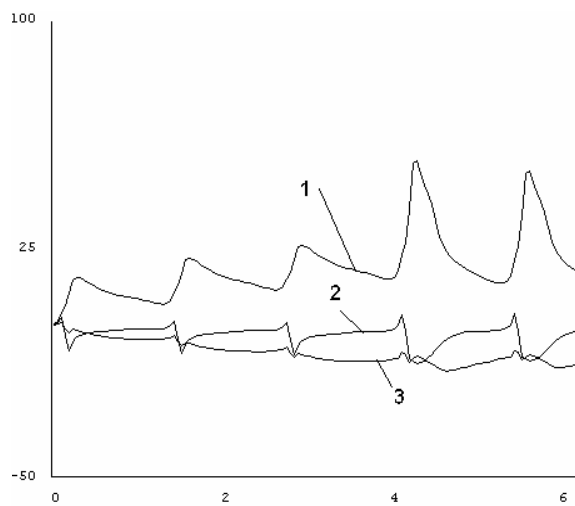
а) однолучевая обработка  $\text{CO}_2$ -лазером



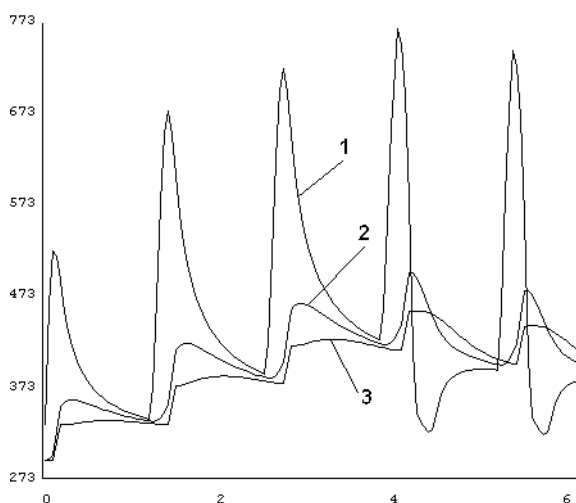
а) однолучевая обработка  $\text{CO}_2$ -лазером



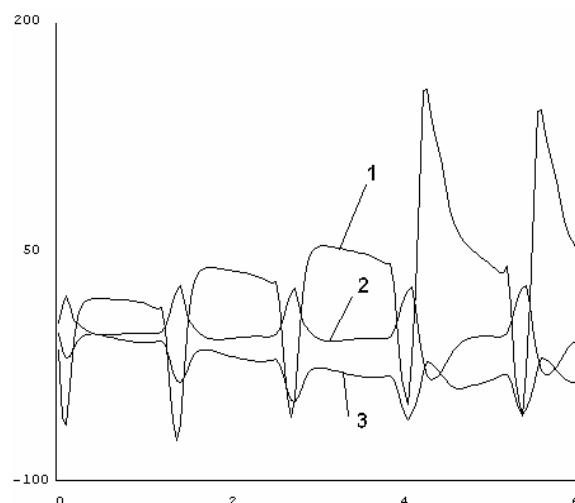
б) однолучевая обработка YAG-лазером



б) однолучевая обработка YAG-лазером



в) двухлучевая обработка



в) двухлучевая обработка

Рисунок 5 – Расчетные зависимости температуры в фиксированных точках от номера оборота при обработке по третьей схеме, К

Рисунок 6 – Расчетные зависимости напряжений в фиксированных точках от номера оборота при обработке по третьей схеме, МПа

Еще одной общей закономерностью зависимостей, полученных при численном моделировании, является то, что на внешней и внутренней поверхности стеклянной трубки формируются напряжения, одинаковые по знаку. При этом напряжения на внешней границе трубки значительно больше, чем на ее внутренней поверхности, а в слоях материала близких к середине стенки трубки, формируются напряжения, противоположные им по знаку.

При обработке по первой схеме (с многократным лазерным нагревом материала) имеет место последовательное чередование в точках поверхности трубки осевых напряжений растяжения и сжатия, сопровождаемое постепенным увеличением напряжений растяжения. Такое изменение напряжений обуславливает в итоге сквозное разделение трубки. Однако качество такого разделения часто недостаточно высокое.

При использовании второй схемы обработки на поверхности трубки практически после первого оборота возникают растягивающие напряжения, достаточные для формирования разделяющей трещины. В дальнейшем без существенных изменений периодически растягивающие осевые напряжения, которые возникают в зоне воздействия лазерного излучения, сменяются сжимающими напряжениями, формируемыми в зоне воздействия хладагента. При использовании данной схемы обеспечивается развитие несквозной разделяющей трещины, особенности формирования которой в целом такие же, как в процессе управляемого лазерного термораскалывания плоскопараллельных образцов. Полученные при использовании данной схемы торцевые поверхности характеризуются высоким качеством. Недостатком данной технологии является необходимость механического докола для получения окончательного изделия.

При использовании третьей схемы, являющейся последовательным сочетанием первых двух, как и температурные зависимости, зависимости осевых напряжений от номера оборота на первом этапе совпадают по характеру с зависимостями, полученными с применением первой схемы обработки, а на втором этапе – с зависимостями, полученными с применением второй схемы. При использовании третьей схемы обеспечивается получение сквозной трещины с высоким качеством получаемых поверхностей разделения. Таким образом, на практике наиболее

эффективно применение двулучевой обработки по схеме, в которой предварительный лазерный нагрев обрабатываемого материала в течение нескольких оборотов сочетается с совместным воздействием на материал вдоль контура обработки лазерного излучения и хладагента, обуславливающим формирование разделяющей трещины.

### Заключение

Наиболее эффективным методом разделения стеклоизделий трубчатой формы является двулучевая обработка по схеме, использующей предварительный лазерный нагрев обрабатываемого материала в течение нескольких оборотов с последующим формированием разделяющей микротрещины при совместном воздействии на контур обработки лазерного излучения и хладагента.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Мачулка, Г.А.* Лазерная обработка стекла. – М. : Сов. радио, 1979. – 136 с.
2. *Способ резки полых стеклоизделий:* пат. 2015118 РФ, МКИ 5 C03B33/00 / И.А. Орлов, В. С. Чадин ; – №4942111/33; заявл. 1991.06.17; опубл. 1994.06.30.
3. *Кондратенко, В.С.* Термораскалывание стеклянных трубок под действием лазерного излучения / В.С. Кондратенко, А.С. Танасейчук, Е. Б. Шершнев // Электронная техника. – 1986. – № 4. – С. 30–37.
4. *Двулучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов* / С.В. Шалупаев [и др.] // Оптический журнал. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.
5. *Шалупаев, С.В.* Лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам / С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 2. – С. 11–15.
6. *Шабров, Н.Н.* Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1983. – 212 с.
7. *Богуславский, И.А.* Высокопрочные закаленные стекла / И.А. Богуславский. – М. : Издательство литературы по строительству, 1969. – 208 с.

*Поступила в редакцию 09.08.10.*